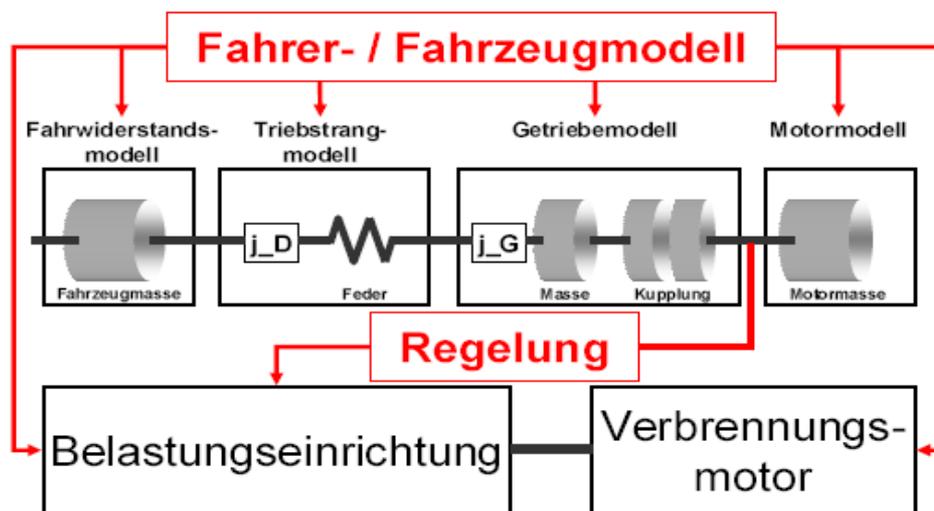


**1 Skizzieren Sie schematisch den Hochdynamischen Motorenprüfstand mit seinen Komponenten sowie einem Prüfling. Benennen Sie die einzelnen Komponenten und geben Sie die jeweiligen Anforderungen, welche der Betrieb auf diesem Prüfstand an diese Teile stellt an.**

### 1.1 Schema des Motorenprüfstandes



- Verbrennungsmotor → Prüfling
- Belastungseinrichtung → 4 Quadranten ASM
- Fahrwiderstandsmodell → soll die realen Fahrzeugmassen sowie einwirkenden die Roll- und Luftwiderstände widerspiegeln
- Triebstrangmodell → soll die realen Feder- und Dämpfereigenschaften des Triebstrangs und dessen Trägheitsmomente wiedergeben
- Getriebemodell → soll die jeweiligen Übersetzungen, Wirkungsgrade zwischen Motor und Triebstrang so real wie nur möglich wiedergeben und beherbergt außerdem noch die Elastizitäten und Trägheitsmomente des Getriebes
- Motormodell → soll Motormasse und dessen Trägheitsmomente wiedergeben
- Fahrer-/Fahrzeugmodell → um ein reales Fahrer-/Fahrzeugmodell darstellen zu können sind die eben genannten Modelle und eine entsprechende Regelung notwendig

## **1.2 Anforderungen an die Komponenten**

### Belastungseinrichtung:

Drehzahlgradienten von 10.000 (U/min)/s auch noch bei Motordrehzahlen von bis zu 6000 U/min sollten erreicht werden. Die Maximaldrehzahl beträgt 8000 U/min, die maximale Leistung liegt bei 450 kW, und das polare Trägheitsmoment der Asynchronmaschine sollte sehr klein sein. Es werden nur zwei Quadranten benötigt, da die Drehrichtung des Motors in eine Richtung festgelegt ist.

### Messtechnik

Es wird Messtechnik für eine schnelle Drehmomentmessung sowie schnelle Kraftstoffverbrauchs- und Luftmassenstrommessung benötigt. Weiterhin werden eine Druckindizierung und die schnelle Erfassung zahlreicher Messgrößen gefordert. Der Prüfstand sollte außerdem über eine schnelle Abgasmessanlage für CO bzw. CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> und HC verfügen. Die Zuleitungen für die Abgasmessungen sollten einen sehr kleinen Querschnitt aufweisen um eine hohe Strömungsgeschwindigkeit zu gewährleisten und sehr kurz sein. Dadurch kann ein schnelles Erreichen der Messanlage gewährleistet werden.

## **2 Wodurch entstehen beim Betrieb mit aufgeladenen Motoren an die Prüfstandsregelung erhöhte Anforderungen? Nennen Sie in diesem Zusammenhang die Auswirkungen für den Regler, wenn ein Motorkennfeld hinterlegt wird! Wofür benötigt der Prüfstand eine hohe Drehzahldynamik?**

### ***2.1 Anforderungen an die Prüfstandsregelung***

Bei den Prüfständen für aufgeladene Motoren ist eine hohe Zahl von zu regelnden Größen zu berücksichtigen. Der Ladedruck wird über die Ansteuerung der Waste-Gate-Dose reguliert und auch die Abgastemperatur und die Ansaugtemperatur können über den Regler angesteuert werden. Dies setzt einen hohen Anspruch an die Verarbeitungsgeschwindigkeit des Reglers voraus. Der Regler muss daher, besonders wenn ein Motorkennfeld hinterlegt ist, Echtzeitfähigkeit besitzen. Dies ist notwendig, um einen realen Einsatz zu simulieren.

Weiterhin ist eine hohe Anzahl von Datenein- und -ausgängen vorzusehen, da eine Vielzahl von Ein- und Ausgangsgrößen zu realisieren sind. Auch die Abtastrate der Messeinrichtung sollte sehr groß sein, damit die vielen Daten auch genau und schnell erfasst werden können.

Die hohe Drehzahldynamik wird benötigt, um reale Benutzungszustände des Motors nachzubilden, wie zum Beispiel kurzes Hochdrehen des Motors im Stand, oder Drehzahlsprünge beim Herunterschalten.

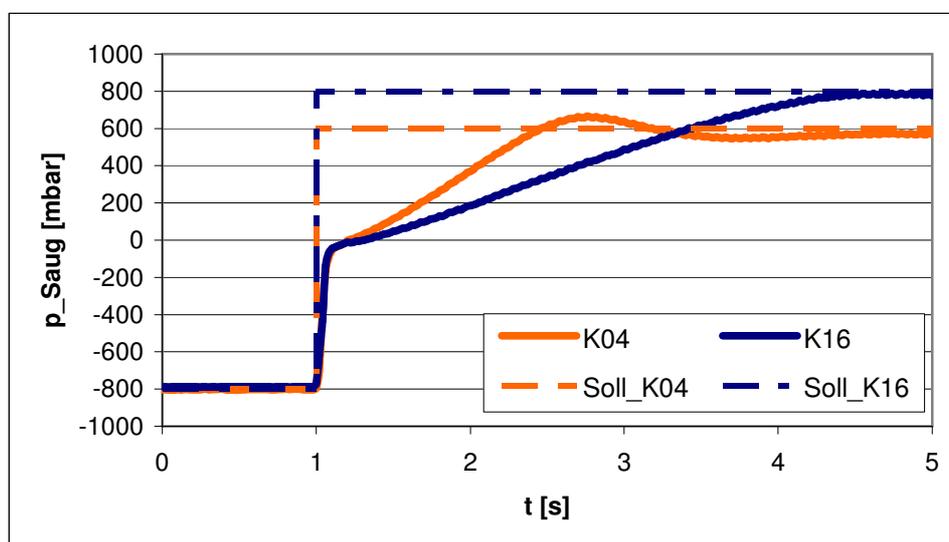
**3 Stellen Sie die mitgelieferten Messdaten für eine Lastaufschaltung für eine Motordrehzahl von 2000 U/min dar. Die beiden Varianten unterscheiden sich durch die Wahl unterschiedlicher Turbolader (K16 =>  $D_{\text{Turbine}} = 55\text{mm}$ , K04 =>  $D_{\text{Turbine}} = 51\text{mm}$ ). Diskutieren Sie die Verläufe! Wie wirkt sich eine Vergrößerung des Turbinendurchmessers auf das Massenträgheitsmoment des Turboladers aus (Quantitativ und Qualitativ)?**

### **3.1 Darstellung und Auswertung der Größen für Lastaufschaltung bei $2000\text{ min}^{-1}$ für 2 verschiedene Turbolader**

2 Turbolader: K04... $\varnothing_{\text{Turbine}} = 51\text{mm}$

K16... $\varnothing_{\text{Turbine}} = 55\text{mm}$

#### **3.1.1 Saugrohrdruck**



Man bemerkt deutlich den Einfluss des Turbinendurchmessers auf das dynamische Verhalten des Motors. An den Saugrohrdruckverläufen erkennt man, dass die Lastaufschaltung nach 1 Sek. erfolgt, denn hier beginnt der Saugrohrdruck zu steigen. Zunächst steigen beide Saugrohrdrücke sprunghaft an, wobei sich der Einfluss der eine kleinere Turbine des K04 und somit sein kleineres

Trägheitsmoment deutlich bemerkbar macht. der Ladedruck erhöht sich hier deutlich schneller.

Aufgrund der größeren Trägheit des Laders K16 wird mehr Energie benötigt, um das Laufzeug des Laders zu beschleunigen. Unter der Annahme  $\frac{d\varpi}{dt} = konst.$  gilt:

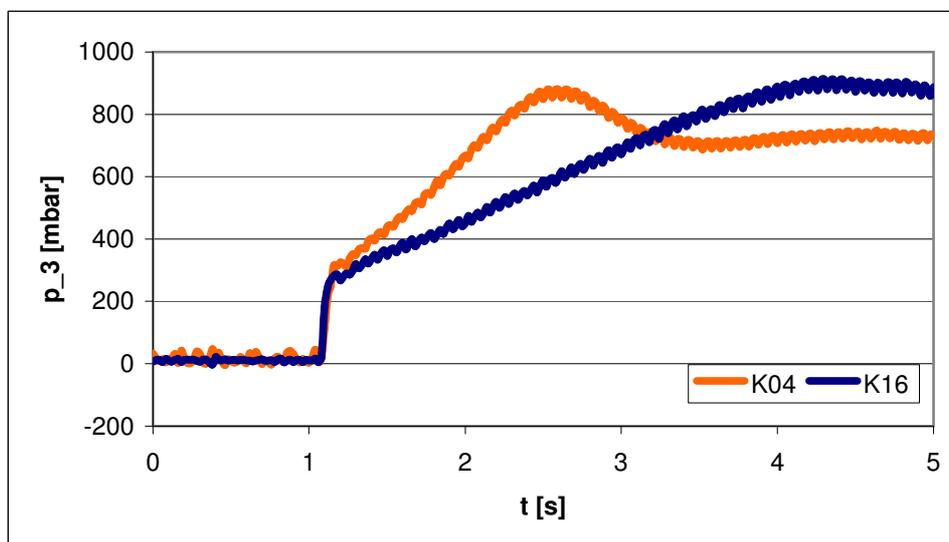
$$M = \frac{d\varpi}{dt} \cdot J_{Lader} \Rightarrow dt = \frac{d\varpi}{M} \cdot J_{Lader} \stackrel{\frac{d\varpi}{dt} = konst.}{\Rightarrow} \Delta t = \frac{\Delta\varpi}{M} \cdot J_{Lader} \Rightarrow \underline{\underline{\Delta t \sim J_{Lader}}}$$

Allerdings ist bei dem größeren ATL bei gleicher Drehzahl auch der maximal erreichbare Ladedruck höher, da mittels der größeren Turbinengeometrie ein größerer Luftdurchsatz erreicht wird.

Anhand der Ladedruckkurve ist deutlich das Verhalten des Reglers erkennbar. Das Überschwingen des Druckverlaufes bei Lader K04 ist durch die Trägheit des Reglers zu erklären. Es handelt sich hierbei um ein PT2-Verhalten.

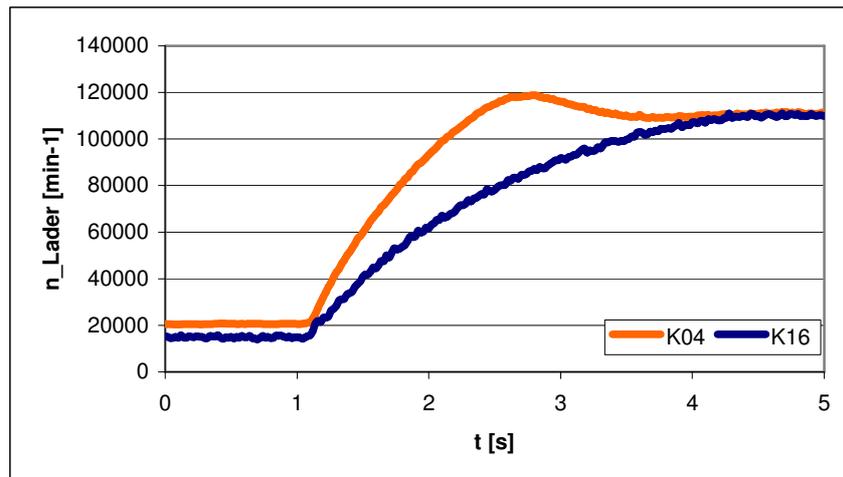
Die gewünschte Wirkung des Reglers ist anhand des Laders K16 zu erkennen. Es kommt hier zu keinem Überschwingen, sondern zu einem sanften Annähern an die Soll-Kurve (PT1-Verhalten).

### 3.1.2 Abgasdruck vor Turbine (p\_3)



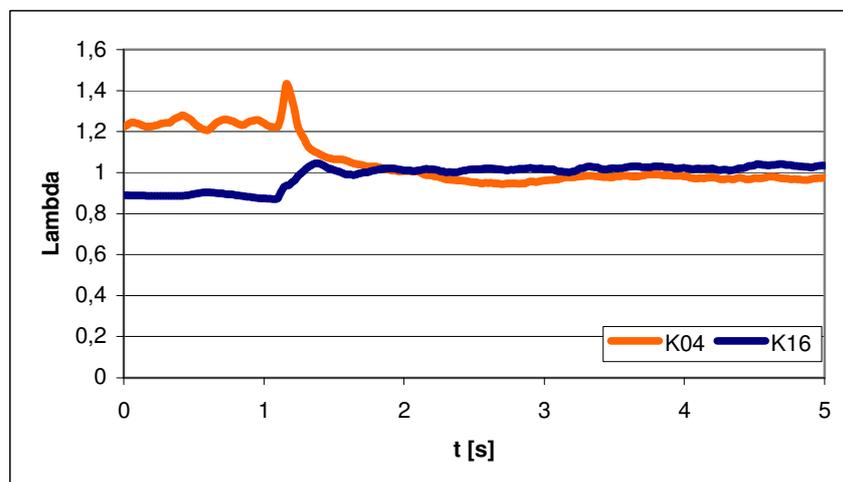
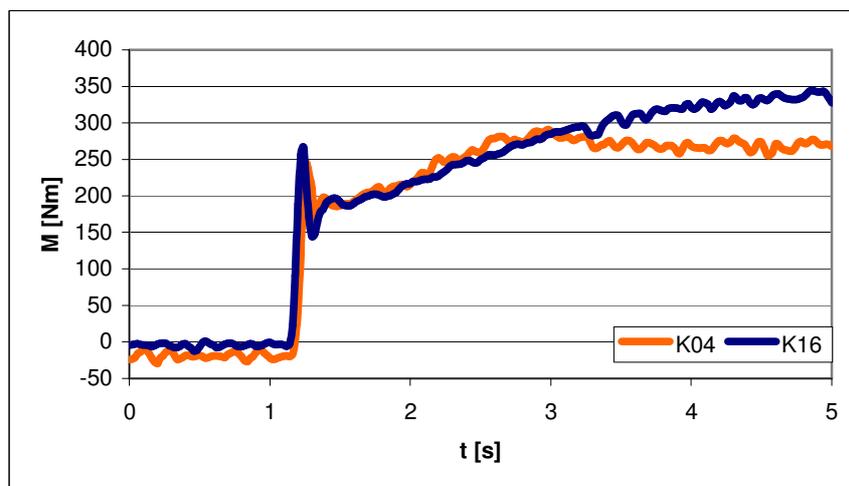
Der Abgasdruck vor Turbine ist abhängig vom Saugdruck und umgekehrt. Das Verhalten ist daher äquivalent.

### 3.1.3 Laderdrehzahl



Die Laderdrehzahl nach dem Lastsprung steigt bei Lader K04 aufgrund des höheren Druckanstieges schneller an als bei Lader K16. Es kommt ebenfalls zu einem Überschwingen. Die Enddrehzahl beider Lader ist gleich.

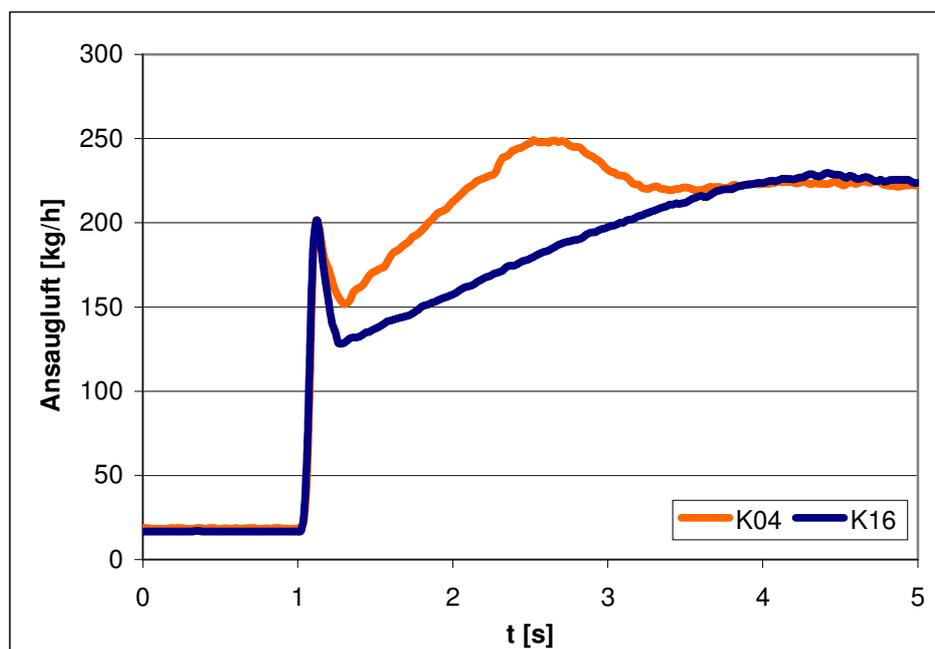
### 3.1.4 Drehmoment und Lambda



Durch den Lastsprung kommt es zu einem sprunghaften Anstieg der Drehzahl des Verbrennungsmotors, welches die Belastungseinrichtung versucht auszuregeln. Das heißt, die Drehzahl soll möglichst konstant gehalten werden. Eine Vorsteuerung des Motorkennfeldes ermöglicht anhand verschiedener theoretischer Modelle (z.B. Wandfilm) und Messgrößen (z.B. Luftmassenstrom und Temperatur) eine Vorausberechnung der einzuspritzenden Kraftstoffmasse. Diese Vorausberechnung ermöglicht die Anpassung dieser Werte ohne Durchlaufen eines kompletten Arbeitsspieles, wie es ohne Vorausberechnung notwendig wäre. Die Sprünge in Lambda- und Momentenverlauf bei  $t=1\text{s}$  sind durch die Abweichung der Vorausberechnung von den realen Gegebenheiten zu erklären.

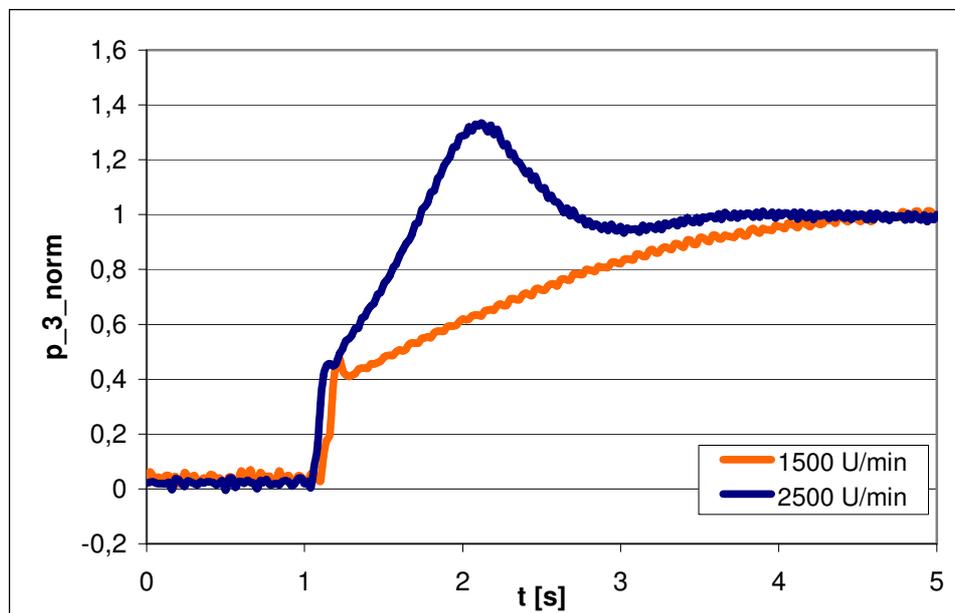
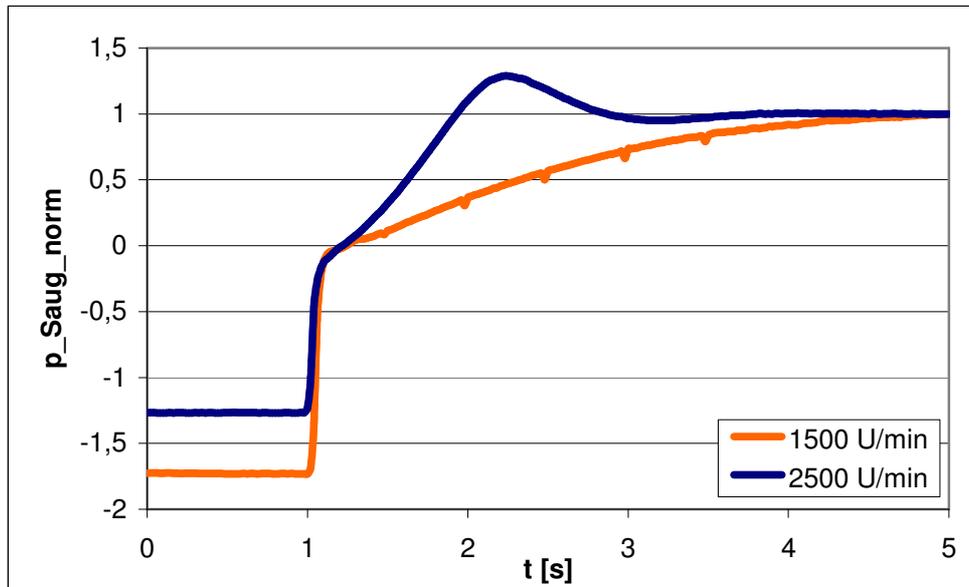
Nach den Sprüngen kommt es zur Regelung der Werte. Erkennbar ist hier wieder das Überschwingen des kleinen Laders bzw. die allmähliche Sollwert-Anpassung des großen Laders.

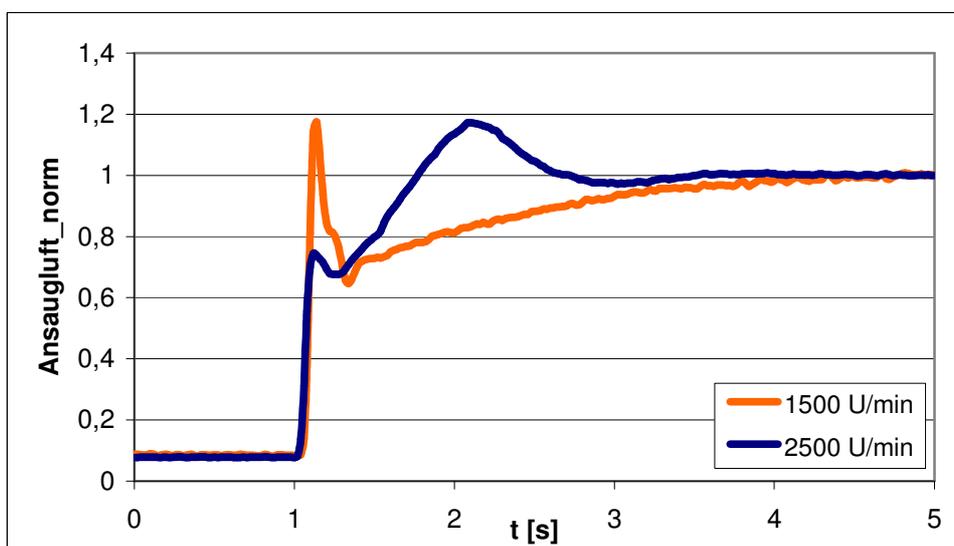
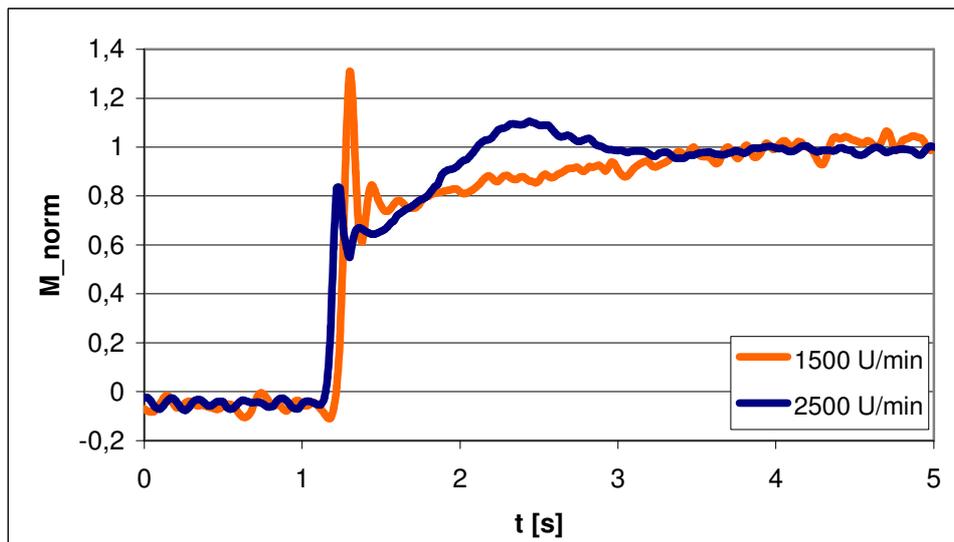
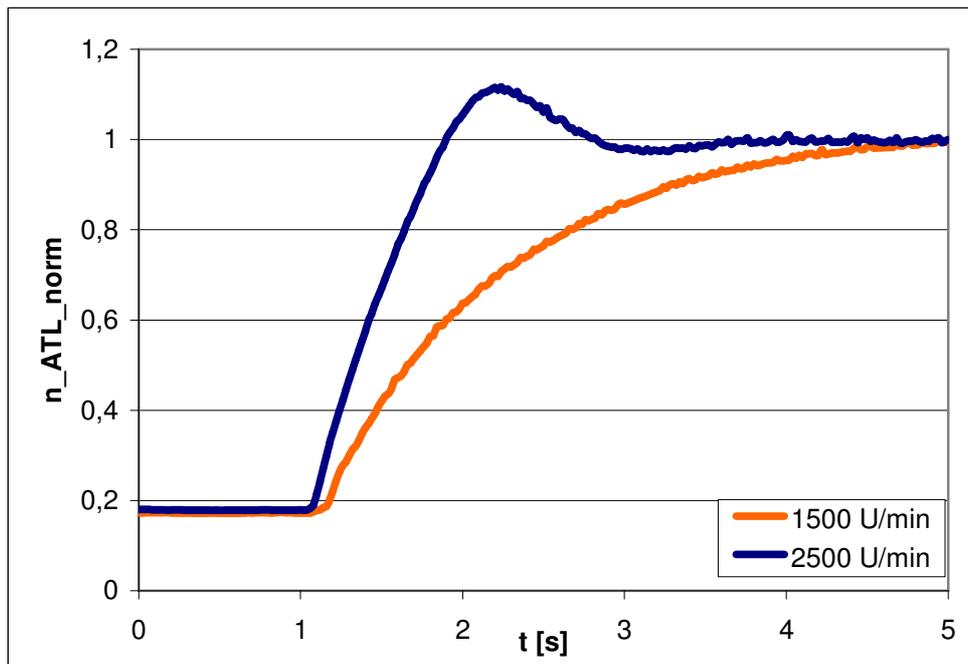
### 3.1.5 Ansaugluft

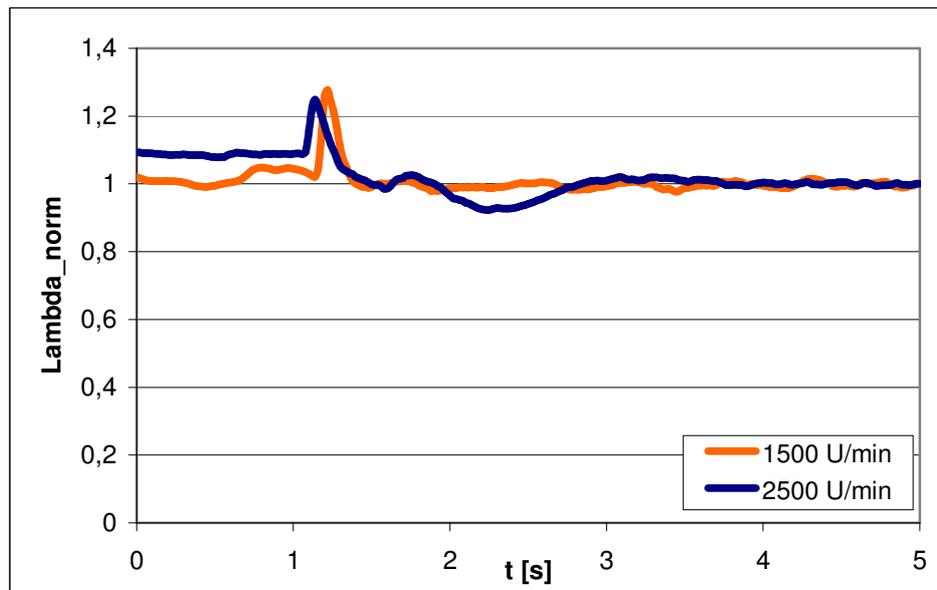


Das Verhalten des Ansaugluftverlaufes verhält sich proportional den zuvor behandelten Einflussgrößen.

- 4 Stellen Sie die Messungen für den Motor mit K04 für eine Lastaufschaltung von 1500 U/min und 2500 U/min in einem Diagramm dar! Normieren Sie die jeweiligen Endwerte auf 100% bzw. 1! Begründen Sie den Unterschied im Verlauf!







Die Unterschiede kann man darin begründet sehen, dass bei einer Drehzahl von  $1500 \text{ min}^{-1}$  der Lader noch nicht genutzt wird. Das heißt er muss erst in Bewegung versetzt werden und der Ladedruck muss sich erst aufbauen. Diese Trägheit des Laufzeugs bewirkt ein langsames ansteigen der Drehzahl des ATL. Dies beeinflusst auch den Verlauf von allen anderen Größen. Wenn sich der Ladedruck nicht schlagartig stark erhöht, dann hat die Regelung genügend Zeit die Auswirkungen durch das Schalten der Störgröße auszuregeln. Damit steigen alle Kurven relativ konstant. Es entstehen nur kleinere Spitzen im Verlauf der Funktionen von  $M_{ist}$ ,  $p_3$  und der Ansaugluftmasse. Dieser lässt sich mit einer Beschleunigungsanreicherung erklären. Da die Lambdaregelung kurzfristig überbrückt wird, um eine gute Beschleunigung und ein hohes Moment zu erzielen.

Bei  $2500 \text{ min}^{-1}$  hingegen ist der Lader schon im Druckaufbau begriffen. Des Weiteren ist auch das Anlaufmoment schon überwunden und das Laufzeug kann leichter hochdrehen. Dann erreicht der Lader seine maximale Drehzahl von  $132.400 \text{ min}^{-1}$  nach 2,2 Sekunden. Diese liegt weit über der Maximaldrehzahl der Lastaufschaltung bei  $1500 \text{ min}^{-1}$  nach 5s ( $98.000 \text{ min}^{-1}$ ). Da der Lader an dieser Stelle überschwingt liegen auch an dieser Stelle die Maxima der Motorkennwerte. Die Laderdrehzahl regelt sich danach auf ihren IST-Wert ein. Dieser liegt unter dem Wert bei 2,2 Sekunden, wodurch auch alle anderen Werte wieder absinken um sich auf ihre Normwerte einzuregeln.

**5 Wodurch entstehen im dynamischen Bereich Abweichungen im Verbrennungsluftverhältnis vom stöchiometrischen Betrieb? Wann ist im Motorkennfeld eine prinzipielles Verlassen des  $\lambda = 1$  unumgänglich? Wodurch ist die dynamische Drehmomentüberhöhung bei 2500 U/min zu begründen?**

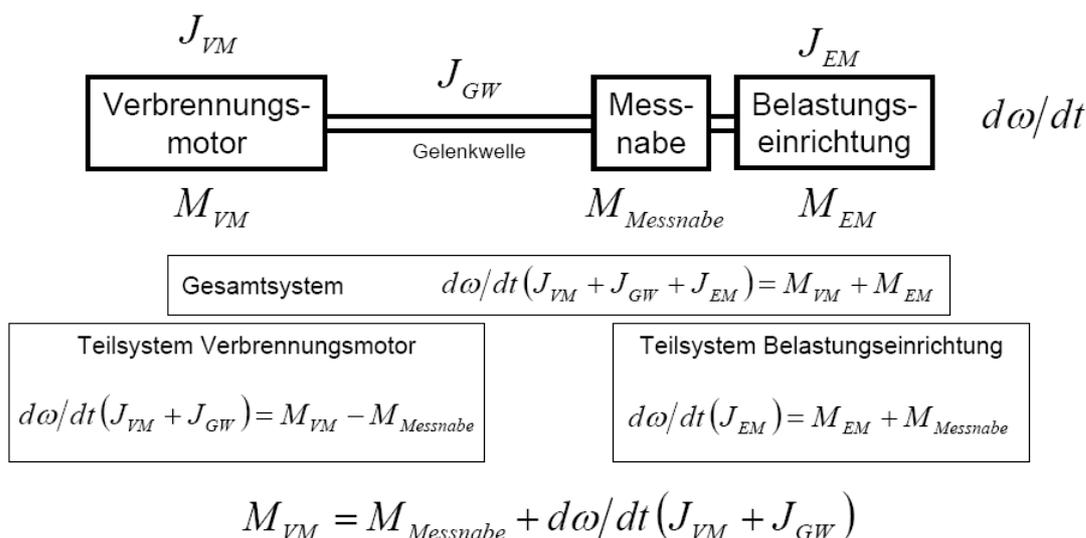
Im normalen Betrieb treten Lambdaunterschiede bei einem Lastsprung auf. Hier spielt die Trägheit der Lambdasonde eine Rolle, da diese erstmal auf das Umschalten der Störgröße reagieren muss. Dieser Effekt ist auch erwünscht, deshalb werden zur Beschleunigungsanfertigung oft auch die Lambdasonden in einen „Open-Loop“-Modus geschaltet. Dieser setzt die Lambda-Regelung kurzfristig außer Kraft, um eine bestmögliche Beschleunigung zu gewährleisten.

Die dynamische Drehmomentüberhöhung kann man mit dem Überdrehen des Laders erklären. Der Lader hat schon leichten Ladedruck aufgebaut, er gibt also schon Leistung ab und braucht keine große Leistung mehr aufzunehmen, um seine Drehzahl zu erhöhen. Schaltet man nun eine Last auf, so steigt  $p_3$  schlagartig an und der Lader wird beschleunigt. Die Beschleunigungsleistung, die hierbei auf ihn wirkt reicht aus, um ihn über seine eigentliche Nenndrehzahl zu beschleunigen. Durch dieses „Überdrehen“ gibt es kurzzeitig eine Überhöhung des Drehmomentes, die aber mit Sinken der Laderdrehzahl auf den normalen Maximalwert wieder absinkt.

**6 Während einer Lastaufschaltung in der Reglerbetriebsart W/n (nicht vorgesteuerter Regler) wurden die Drehzahl und das (scheinbare) Motormoment bestimmt. Korrigieren Sie das Drehmoment auf den effektiv an der Kupplung anliegenden Wert! Das polare Trägheitsmoment des Versuchsaufbaus lag bei 5.5 kgm<sup>2</sup>. Stellen Sie alle Größen in einem Diagramm dar!**

### 6.1 Korrektur des Motormomentes über Drallsatz

#### 6.1.1 allgemein



#### 6.1.2 Teilsystem

$$\rightarrow M_{VM} = M_{Messnabe} + \frac{d\varpi}{dt} \cdot (J_{VM} + J_{GW}) \text{ mit: } J_{GW} \approx 0$$

$$J_{VM} = 5,5 \text{ kgm}^2$$

Zur Darstellung der Kennlinien wurden die aufgenommenen Messwerte gefiltert und mit Hilfe des Drallsatzes korrigiert. Die Geschwindigkeitsänderung  $\frac{d\varpi}{dt}$  wird als

$$\text{konstant angenommen} \rightarrow \frac{\Delta\varpi}{\Delta t} = \frac{2\pi \cdot \Delta n}{\Delta t} .$$

Das Diagramm zeigt das ungefilterte, gefilterte und mittels Drallsatz korrigierte Drehmoment. Des Weiteren ist die Motordrehzahl während der Lastaufschaltung dargestellt.

